

(19)



JAPANESE PATENT OFFICE

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11) Publication number: **2001166806 A**
(43) Date of publication of application: **22.06.2001**

(51) Int. Cl. **G05B 19/4061**

B25J 13/00, B25J 19/00, G05B 19/4097, G06F 17/50

(21) Application number: **2000309792**

(22) Date of filing: **10.10.2000**

(30) Priority: **08.10.1999 US 1999 414618**

(71) Applicant: **DASSAULT SYSTEMES**

(72) Inventor: **BARRAL DAVID**

(54) METHOD FOR OPERATING COMPUTER SYSTEM, COMPUTER DATA SIGNAL, CAD/CAM DEVICE, AND METHOD FOR SEARCHING DATA SET

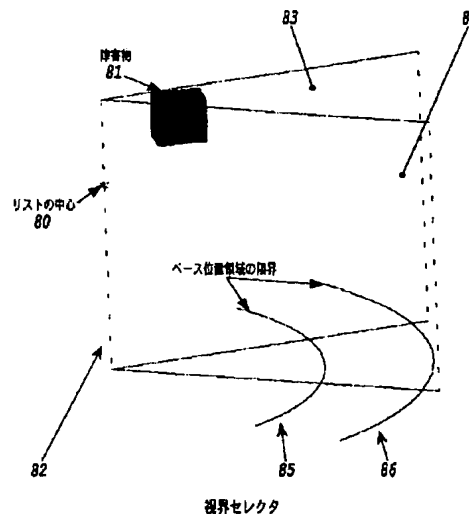
position area, so that the inspection area is simplified.

COPYRIGHT: (C)2001,JPO

(57) Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To provide a method and a system for optimizing the arrangement of a robot in a working place so as to minimize the cycle time.

SOLUTION: A corrected simulated annealing(SA) method is applied to a robot arrangement problem in a CAD system by a welding work context. An objective function for optimization is a cycle time, which is obtained from usable robotic CAD software. An inspection area is simplified, the SA method is applied to the inspection area and an optimum or almost optimum solution for each problem is obtained. In order to obtain the optimum arrangement of the robot, an allowable base position area is determined and then an obstacle shadow is determined and subtracted from the allowable base position area to obtain a free allowable base



(19)日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11)特許出願公開番号

特開2001-166806

(P2001-166806A)

(43)公開日 平成13年6月22日(2001.6.22)

(51)Int.Cl. ⁷	識別記号	F I	テーマコード*(参考)
G 0 5 B 19/4061		C 0 5 B 19/4061	M
B 2 5 J 13/00		B 2 5 J 13/00	Z
19/00		19/00	Z
G 0 5 B 19/4097		C 0 5 B 19/4097	C
G 0 6 F 17/50	6 0 4	C 0 6 F 17/50	6 0 4 A
審査請求 未請求 請求項の数9 OL (全 19 頁) 最終頁に続く			

(21)出願番号 特願2000-309792(P2000-309792)

(22)出願日 平成12年10月10日(2000.10.10)

(31)優先権主張番号 09/414618

(32)優先日 平成11年10月8日(1999.10.8)

(33)優先権主張国 米国 (U S)

(71)出願人 500102435

ダサルト システムズ

DASSAULT SYSTEMES

フランス 92156 シュレヌ セデックス,

ペーペー 310 ケ マルセル ダサルト

9

(72)発明者 デイビッド バラール

フランス 95200 リュエイユ -マルメゾ

ン リュ デュ ジェネラル コロニュー

10

(74)代理人 10007/481

弁理士 谷 義一 (外2名)

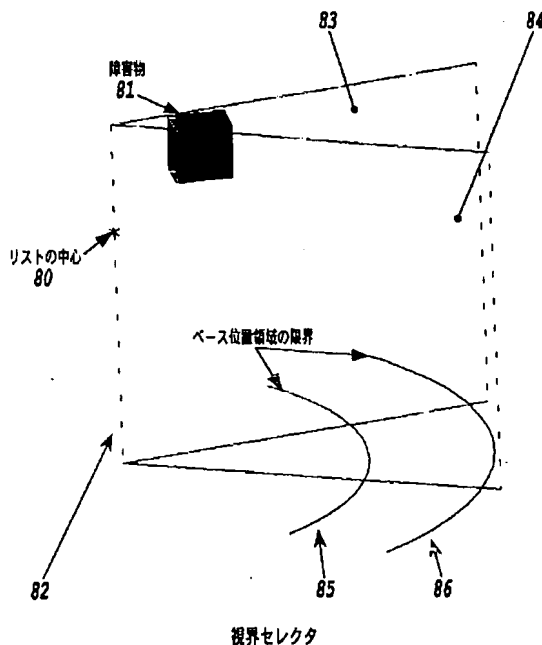
最終頁に続く

(54)【発明の名称】 コンピュータシステム操作方法およびコンピュータデータ信号ならびにCAD/CAM装置、データのセットを探索する方法

(57)【要約】

【課題】 サイクルタイムを最小限にするように作業場所中のロボットの配置を最適化するための方法およびシステムを提供する。

【解決手段】 修正されたシミュレーテッドアニーリング法(SA)が、溶接作業のコンテキストでCADシステムにおけるロボット配置の問題に適用される。最適化に対する目的関数はサイクルタイムであり、これは、利用可能なロボティックCADソフトウェアから得られる。調査領域は単純化され、SA法が適用されて、各問題への最適なまたはほぼ最適な解がもたらされる。ロボットの最適配置を得るために、まず許容ベース位置領域を決定し、次いで障害物シャドウを決定し、障害物シャドウを前の領域から差し引いてフリー許容ベース位置領域を得ることによって、調査領域が単純化される。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 所与の作業を完了するためのサイクルタイムを最小限にするように作業場所環境中のロボットの配置を最適化するためにCADシステムで使用するコンピュータシステム操作方法であって、

ロボットのエンドエフェクタが所与の作業を完了するための一組のワークポイントを規定し、前記ロボットのベースを配置するための許容ベース位置領域を計算するステップであって、前記許容ベース位置はエンドエフェクタがすべてのワークポイントに届くように前記ロボットベースが配置されるエリアを規定し、前記許容ベース位置領域内で、前記ロボットと作業場所環境中の物体との間で衝突が生じることになるロボットベース配置の範囲を規定する障害物シャドウを計算し、前記障害物シャドウを前記許容ベース位置領域から差し引くことによって、前記ロボットベースを配置するためのフリー許容ベース位置領域を計算することを備えたことを特徴とする方法。

【請求項2】 前記許容ベース位置領域の前記計算は、

- a) 前記ロボットの前記エンドエフェクタがワークポイントに固定された場合のシミュレーションを行い、
- b) 前記エンドエフェクタが前記ワークポイントに固定して取り付けられる間に、前記ロボットのリストジョイントの離散的な一組のポジションを選択し、
- c) 離散的なリストポジションのそれぞれに前記ロボットの主要アームをその運動範囲にわたって掃引し、前記ロボットベースが移動したエリアを記録し、
- d) ステップa) からc) を各ワークポイントに対して行い、
- e) ステップd) で記録されたすべてのエリアに共通のエリアを許容ベース位置領域として選択することを備えたことを特徴とする請求項1に記載の方法。

【請求項3】 前記作業場所環境中の障害物に対する障害物シャドウの前記計算は、

- a) 前記エンドエフェクタがワークポイントに固定された場合の各ワークポイントの前記障害物に対する視界セクタを計算し、
- b) 前記視界セクタの二分線として大域パスを規定し、
- c) 前記大域パスと前記許容ベース位置領域の外側の輪郭との交差点を初期ポイントとして規定し、
- d) 前記大域パスと前記許容ベース位置領域の内側の輪郭との交差点を目標ポイントとして規定し、
- e) 前記ロボットのベースを、衝突が検出されるまで前記初期ポイントから前記大域パスに沿って動かし、
- f) 前記ロボットベースを前記許容ベース位置領域の外側の輪郭に沿って第1の方向に動かすことによって新しい初期ポジションを規定し、
- g) 前記ロボットのベースを、衝突が検出されるまで前記新しい初期ポイントから前記目標ポイントまでのパスに沿って動かし、

h) 前記ベースを衝突なく前記目標ポイントに動かすことができるまでステップf) およびg) を繰り返す、

i) 前記ベースを前記初期ポジションに動かして戻し、

j) 前記ロボットベースを前記許容ベース位置領域の外側の輪郭に沿って第2の方向に動かすことによって新しい初期ポジションを規定し、

k) 前記ロボットのベースを、衝突が検出されるまで前記新しい初期ポイントから前記目標ポイントまでのパスに沿って動かし、

l) 前記ベースを衝突なく前記目標ポイントに動かすことができるまでステップj) およびk) を繰り返す、

m) 前の前記目標ポイントとして規定された前記初期ポイントと、前の前記初期ポイントとして規定された前記目標ポイントでステップe) からl) までを繰り返すことを備えたことを特徴とする請求項1に記載の方法。

【請求項4】 ロボットの物理構成を表すデータ、前記ロボットがそれに対して作業を行うべきワークの物理構成を表すデータ、前記ロボットおよびワークが共存すべき物理環境を表すデータ、およびフリー許容ロボットベース位置領域を表すデータを備えたデジタルデータストリーム中に組み入れられたコンピュータデータ信号であって、該コンピュータデータ信号は、

前記ロボットのエンドエフェクタに対する一組のワークポイントを規定するステップと、

ロボットのベースを配置するための許容ベース位置領域を計算するステップであって、前記許容ベース位置はエンドエフェクタがすべてのワークポイントに届くように前記ロボットベースが配置されるエリアを規定するステップと、

前記許容ベース位置領域内で、前記ロボットとその環境中の物体との間で衝突が生じることになるロボットベース配置の範囲を規定する障害物シャドウを計算するステップと、

前記障害物シャドウを前記許容ベース位置領域から差し引くことによってフリー許容ベース位置領域を計算するステップとを備えた方法によって生成されることを特徴とするコンピュータデータ信号。

【請求項5】 入力装置と、

中央処理装置と、

データを記憶するためのメモリ素子とを備えたCAD/CAM装置であって、

前記中央処理装置は、許容ベース位置領域、障害物シャドウ、およびフリー許容ベース位置領域を計算するためのコードを備えたアプリケーションプログラムを稼働させ、前記フリー許容ベース位置領域は、前記障害物シャドウを前記許容ベース位置領域から差し引くことによって計算されることを特徴とするCAD/CAM装置。

【請求項6】 ロボットベースを作業場所環境中に配置するための位置を含むデータのセットを探索する方法であって、前記位置は、前記ロボットのエンドエフェクタ

が一組のワークポイントのそれぞれに届くことを可能にすることになる位置であり、前記方法により、一組の離散的なロボットベース位置が前記データセットから選択され、それにより、前記ロボットのエンドエフェクタが前記一組のワークポイントのそれぞれを移動するための最小限の時間量が得られ、前記方法は、従来のシミュレーテッドアニーリング法に対する修正を利用して前記データのセットを探索し、前記修正は、極小値がシミュレーテッドアニーリングプロセス中にみられたときにそれを記憶し、前記極小値のそれぞれに対応して、極小データポイントを取り巻くエリアを備えたアトラクションエリアを確立し、アトラクションエリア内にないフリー許容ベース位置領域からのデータポイントがみられたとき、シミュレーテッドアニーリング法の温度関数をゼロの値に設定することによって傾斜下降を行い、傾斜下降がアトラクションエリア内に収まるデータポイントを生成するとき、傾斜下降がそこから始まったデータポイントを前記アトラクションエリアが含むようにアトラクションエリアを再規定することを備えたことを特徴とする方法。

【請求項7】 探索される前記データのセットは本質的にフリー許容ベース位置領域からなることを特徴とする請求項6に記載の方法。

【請求項8】 作業場所環境中にロボットベースを配置するための一組の位置を表すデータを備えたデジタルデータストリーム中に組み入れられたコンピュータデータ信号であって、前記位置は、前記ロボットのエンドエフェクタが最小限の時間量で一組のワークポイントのそれぞれに届くことを可能にすることになる位置であり、前記データ信号は、

修正されたシミュレーテッドアニーリング法を使用してフリー許容ベース位置領域を探索することを備えた方法によって得られ、前記修正は、

極小値が標準的なシミュレーテッドアニーリングプロセス中にみられたときにそれを記憶し、

前記極小値のそれぞれに対応して、極小データポイントを取り巻くエリアを備えたアトラクションエリアを確立し、

アトラクションエリア内にないフリー許容ベース位置領域からのデータポイントがみられたとき、シミュレーテッドアニーリング法の温度関数をゼロの値に設定することによって傾斜下降を行い、

傾斜下降がアトラクションエリア内に収まるデータポイントを生成するとき、傾斜下降がそこから始まったデータポイントを前記アトラクションエリアが含むようにアトラクションエリアを再規定することを備えたことを特徴とするコンピュータデータ信号。

【請求項9】 入力装置と、

中央処理装置と、

データを記憶するための記憶装置と、

表示装置とを備えたCAD/CAM装置であって、

前記中央処理装置は、データの探索を実行して一組の離散的な最適データポイントを見つけるためのコードを備えたアプリケーションプログラムを稼働させ、前記探索は、修正されたシミュレーテッドアニーリング法を備え、前記シミュレーテッドアニーリング法に対する前記修正は、

極小値が前記シミュレーテッドアニーリングプロセス中にみられたときにそれを記憶し、

前記極小値のそれぞれに対応して、極小データポイントを取り巻くエリアを備えたアトラクションエリアを記憶し、

アトラクションエリア内にないフリー許容ベース位置領域からのデータポイントがみられたとき、前記シミュレーテッドアニーリング法の温度関数をゼロの値に設定することによって傾斜下降を行い、および、傾斜下降がアトラクションエリア内に収まるデータポイントを生成するとき、傾斜下降がそこから始まったデータポイントを前記アトラクションエリアが含むようにアトラクションエリアを再規定および記憶することを備えたことを特徴とするCAD/CAM装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、コンピュータソフトウェアユーティリティプログラムに関し、より詳細には、コンピュータ援用設計(CAD、computer aided design)、コンピュータ援用製造(CAM、computer aided manufacturing)、およびコンピュータ支援エンジニアリング(CAE、computer aided engineering)の分野のプログラムに関し、特に、製造用設備におけるロボットの正しい物理位置を決定するためにこのようなシステムを使用することに関する。

【0002】

【従来の技術】ロボットは、自動化製造プロセスで広く使用されている。ロボットを採用して、正確かつ時間効率のよい方式で反復作業を行うことができる。例えば、自動車のフレームにスポット溶接を加えるためにロボットが自動車製造ラインに利用され、その結果、手作業労働によって達成できるよりも時間効率のよい方式で正確な溶接位置を得る。通常の製造プロセスでは、ロボットは、ポイントツーポイント(point-to-point)の動きの反復シーケンスを行い、各ポイントで停止する。例えば、ロボットは、プログラムされた各停止位置でアセンブリにスポット溶接を加えることになる。用語「ワークポイント(work point)」とは、本明細書で使用するとき、ロボットがワークに対し

て作業を行うべき各停止位置を意味する。用語「ワークプラン (workplan)」とは、一組のワークポイントを指し、「軌道 (trajectory)」とは、ワークプラン中のあるワークポイントから次のワークポイントに直接に移動するときロボットのエンドエフェクタ (end-effector) によって行われるパスを指す。

【0003】ロボットの生産性は、ワークプランを完了するためのサイクルタイムを最小限にすることによって、かなり向上させることができる。所与のロボットに対するサイクルタイムは、作業に対して相対的なマニピュレータのポジション、ポイントが訪れられるシーケンス、アクチュエータの最大速度および加速度、ポイントの相対ポジション、およびロボティックアームの構成など、多くのパラメータによって決まる。ロボットは、そのワークステーションに不適切に配置されると、非効率的な動作、さらには故障のリスクを冒す。したがって、指定のワークプランに対するサイクルタイムを最小限にできるようにロボットポジションを選択するためのシステムが必要とされている。

【0004】既存のCADシステムを使用して、ロボットを含めた製造用設備をモデリングすることができる。このようなCADシステムは、それに対して作業が行われることになるアイテムの構成、作業場所環境中の物体の構成、およびロボット自体の構成を詳述したデータを装備されたとき、作業場所をモデリングするのに使用される。各アイテムは、設備をモデリングする目的で作業場所内にグラフィカルに配置することができる。次いで、ロボットをグラフィカルに動かして、作業の実現可能性および効率をチェックすることができる。周知のCADシステムでは、所与のワークプランに対するサイクルタイムの計算は、ユーザが実行すべき、時間のかかる試行錯誤ループを必要とし、その中でロボットの動きがグラフィカルにシミュレートされる。サイクルタイムを削減するために、オペレータは、提案されたロボットベースポジションのセットを選択し、次いで、提案された各ロボットベースポジションに対するロボットの動きのシミュレーションを行って、ポジション実現可能性およびサイクルタイムの比較を得なければならない。これは、多量のCPU時間を必要とし、非効率的である。

【0005】

【発明が解決しようとする課題】したがって、ロボットポジションを最適化して少ないサイクルタイムを得るために簡単に使用できるシステムであって、ユーザが行わなければならない時間のかかる反復プロセスを必要としないシステムが必要とされている。

【0006】

【課題を解決するための手段】このような問題を解決するために、請求項1に記載の発明は、所与の作業を完了するためのサイクルタイムを最小限にするように作業場

所環境中のロボットの配置を最適化するためにCADシステムで使用するコンピュータシステム操作方法であって、ロボットのエンドエフェクタが所与の作業を完了するための一組のワークポイントを規定し、前記ロボットのベースを配置するための許容ベース位置領域を計算するステップであって、前記許容ベース位置はエンドエフェクタがすべてのワークポイントに届くように前記ロボットベースが配置されるエリアを規定し、前記許容ベース位置領域内で、前記ロボットと作業場所環境中の物体との間で衝突が生じることになるロボットベース配置の範囲を規定する障害物シャドウを計算し、前記障害物シャドウを前記許容ベース位置領域から差し引くことによって、前記ロボットベースを配置するためのフリー許容ベース位置領域を計算することを備えたことを特徴とする。

【0007】また、請求項2に記載の発明は、請求項1に記載の方法において、前記許容ベース位置領域の前記計算は、a) 前記ロボットのの前記エンドエフェクタがワークポイントに固定された場合のシミュレーションを行い、b) 前記エンドエフェクタが前記ワークポイントに固定して取り付けられる間に、前記ロボットのリストジョイントの離散的な一組のポジションを選択し、c) 離散的なリストポジションのそれぞれに前記ロボットの主要アームをその運動範囲にわたって掃引し、前記ロボットベースが移動したエリアを記録し、d) ステップa) からc) を各ワークポイントに対して行い、e) ステップd) で記録されたすべてのエリアに共通のエリアを許容ベース位置領域として選択することを備えたことを特徴とする。

【0008】また、請求項3に記載の発明は、請求項1に記載の方法において、前記作業場所環境中の障害物に対する障害物シャドウの前記計算は、a) 前記エンドエフェクタがワークポイントに固定された場合の各ワークポイントの前記障害物に対する視界セクタを計算し、b) 前記視界セクタの二分線として大域パスを規定し、c) 前記大域パスと前記許容ベース位置領域の外側の輪郭との交差点を初期ポイントとして規定し、d) 前記大域パスと前記許容ベース位置領域の内側の輪郭との交差点を目標ポイントとして規定し、e) 前記ロボットのベースを、衝突が検出されるまで前記初期ポイントから前記大域パスに沿って動かし、f) 前記ロボットベースを前記許容ベース位置領域の外側の輪郭に沿って第1の方向に動かすことによって新しい初期ポジションを規定し、g) 前記ロボットのベースを、衝突が検出されるまで前記新しい初期ポイントから前記目標ポイントまでのパスに沿って動かし、h) 前記ベースを衝突なく前記目標ポイントに動かすことができるまでステップf) およびg) を繰り返す、i) 前記ベースを前記初期ポジションに動かして戻し、j) 前記ロボットベースを前記許容ベース位置領域の外側の輪郭に沿って第2の方向に動か

すことによって新しい初期ポジションを規定し、k) 前記ロボットのベースを、衝突が検出されるまで前記新しい初期ポイントから前記目標ポイントまでのパスに沿って動かし、l) 前記ベースを衝突なく前記目標ポイントに動かすことができるまでステップj) およびk) を繰り返す、m) 前記前記目標ポイントとして規定された前記初期ポイントと、前記前記初期ポイントとして規定された前記目標ポイントでステップe) からl) までを繰り返すことを備えたことを特徴とする。

【0009】また、請求項4に記載の発明は、ロボットの物理構成を表すデータ、前記ロボットがそれに対して作業を行うべきワークの物理構成を表すデータ、前記ロボットおよびワークが共存すべき物理環境を表すデータ、およびフリー許容ロボットベース位置領域を表すデータを備えたデジタルデータストリーム中に組み入れられたコンピュータデータ信号であって、該コンピュータデータ信号は、前記ロボットのエンドエフェクタに対する一組のワークポイントを規定するステップと、ロボットのベースを配置するための許容ベース位置領域を計算するステップであって、前記許容ベース位置はエンドエフェクタがすべてのワークポイントに届くように前記ロボットベースが配置されるエリアを規定するステップと、前記許容ベース位置領域内で、前記ロボットとその環境中の物体との間で衝突が生じることになるロボットベース配置の範囲を規定する障害物シャドウを計算するステップと、前記障害物シャドウを前記許容ベース位置領域から差し引くことによってフリー許容ベース位置領域を計算するステップとを備えた方法によって生成されることを特徴とする。

【0010】また、請求項5に記載の発明は、入力装置と、中央処理装置と、データを記憶するためのメモリ素子とを備えたCAD/CAM装置であって、前記中央処理装置は、許容ベース位置領域、障害物シャドウ、およびフリー許容ベース位置領域を計算するためのコードを備えたアプリケーションプログラムを稼働させ、前記フリー許容ベース位置領域は、前記障害物シャドウを前記許容ベース位置領域から差し引くことによって計算されることを特徴とする。また、請求項6に記載の発明は、ロボットベースを作業場所環境中に配置するための位置を含むデータのセットを探索する方法であって、前記位置は、前記ロボットのエンドエフェクタが一組のワークポイントのそれぞれに届くことを可能にする位置であり、前記方法により、一組の離散的なロボットベース位置が前記データセットから選択され、それにより、前記ロボットのエンドエフェクタが前記一組のワークポイントのそれぞれを移動するための最小限の時間量を得られ、前記方法は、従来のシミュレーテッドアニーリング法に対する修正を利用して前記データのセットを探索し、前記修正は、極小値がシミュレーテッドアニーリングプロセス中にみられたときにそれを記憶し、前記

極小値のそれぞれに対応して、極小データポイントを取り巻くエリアを備えたアトラクションエリアを確立し、アトラクションエリア内にはフリー許容ベース位置領域からのデータポイントがみられたとき、シミュレーテッドアニーリング法の温度関数をゼロの値に設定することによって傾斜下降を行い、傾斜下降がアトラクションエリア内に収まるデータポイントを生成するとき、傾斜下降がそこから始まったデータポイントを前記アトラクションエリアが含むようにアトラクションエリアを再規定することを備えたことを特徴とする。

【0011】また、請求項7に記載の発明は、請求項6に記載の方法において、探索される前記データのセットは本質的にフリー許容ベース位置領域からなることを特徴とする。

【0012】また、請求項8に記載の発明は、作業場所環境中にロボットベースを配置するための一組の位置を表すデータを備えたデジタルデータストリーム中に組み入れられたコンピュータデータ信号であって、前記位置は、前記ロボットのエンドエフェクタが最小限の時間量で一組のワークポイントのそれぞれに届くことを可能にすることになる位置であり、前記データ信号は、修正されたシミュレーテッドアニーリング法を使用してフリー許容ベース位置領域を探索することを備えた方法によって得られ、前記修正は、極小値が標準的なシミュレーテッドアニーリングプロセス中にみられたときにそれを記憶し、前記極小値のそれぞれに対応して、極小データポイントを取り巻くエリアを備えたアトラクションエリアを確立し、アトラクションエリア内にはフリー許容ベース位置領域からのデータポイントがみられたとき、シミュレーテッドアニーリング法の温度関数をゼロの値に設定することによって傾斜下降を行い、傾斜下降がアトラクションエリア内に収まるデータポイントを生成するとき、傾斜下降がそこから始まったデータポイントを前記アトラクションエリアが含むようにアトラクションエリアを再規定することを備えたことを特徴とする。

【0013】さらに、請求項9に記載の発明は、入力装置と、中央処理装置と、データを記憶するための記憶装置と、表示装置とを備えたCAD/CAM装置であって、前記中央処理装置は、データの探索を実行して一組の離散的な最適データポイントを見つけるためのコードを備えたアプリケーションプログラムを稼働させ、前記探索は、修正されたシミュレーテッドアニーリング法を備え、前記シミュレーテッドアニーリング法に対する前記修正は、極小値が前記シミュレーテッドアニーリングプロセス中にみられたときにそれを記憶し、前記極小値のそれぞれに対応して、極小データポイントを取り巻くエリアを備えたアトラクションエリアを記憶し、アトラクションエリア内にはフリー許容ベース位置領域からのデータポイントがみられたとき、前記シミュレーテッドアニーリング法の温度関数をゼロの値に設定すること

によって傾斜下降を行い、および、傾斜下降がアトラクションエリア内に収まるデータポイントを生成するとき、傾斜下降がそこから始まったデータポイントを前記アトラクションエリアが含むようにアトラクションエリアを再規定および記憶することを備えたことを特徴とする。

【0014】したがって、本発明は、ワークからみたロボットのベースの可能な最適配置を効率的な仕方で見つけるためのシステム、方法、および装置を提供する。最適配置は、ロボットマニピュレータツールを所与のワークプランに対して最小限の時間量でその軌道を通して動かすことのできる配置として規定される。最適な位置を見つけるために、ロボットベースを配置するためのいくつかの可能な位置を含むエリアが、最適化アルゴリズムを使用して探索される。本発明の一態様によれば、可能なロボットベース位置を含むこの探索すべきエリアは、最適化に向けてテスト、または「探索」するための可能なベース位置の数が削減されるように最小化される。探索空間を最小化する第1のステップは、「許容ロボットベース位置領域 (acceptable robot base location domain)」を計算することからなる。この領域 (domain) は、ロボットのマニピュレータツールがロボットによって行われるワークプラン中の所期の各ワークポイントに届くことができるように、ロボットベースが配置されなければならない水平面内のエリアを規定する。この領域を決定するファクタは、すべてのワークポイントの位置と、ロボットの幾何形状および動的プロファイルである。

【0015】本発明の一態様によれば、許容ロボットベース位置領域の識別に続き、ロボットとその環境との間の衝突の可能性を考慮する必要がある。この目標 (goal) を達成するために、「障害物シャドウ (obstacle shadow)」を規定する方法が呈示されるが、このような障害物シャドウは、そうすることでマニピュレータツールがワークプラン中のワークポイントに伸張されたときにロボットとその環境中のオブジェクトとの間に衝突が起こることになるためにロボットを配置することのできない、許容ロボットベース位置領域の部分を表す。この方法の目的は、ロボットのベースを許容ベース位置領域の水平セクション中で動かして衝突をテストすることによって、「障害物シャドウ」のアウトラインを見つけて規定することである。「障害物シャドウ」は、許容ベース位置領域から差し引かれ、そのサイズ、したがって最適化中に探索すべき可能なベース位置ポジションの数を少なくする。本発明の方法によれば、追従すべき大域パスを規定した後で、ロボットのベースが段階的に動かされて、目標ポイント、通常はワークプラン中のワークポイントが達成される。衝突が起こったときに置換の方向が修正され、次いで、次の反復用の大域パスが再規定される。このステップは、目標ポイント

に達するまで繰り返される。障害物シャドウを左に、次いで右によけて動くことにより、シャドウの閉じた輪郭がそれから導き出される一組のポイントが得られる。前述のように、シャドウの閉じた輪郭は、次いで許容ロボットベース位置領域から差し引かれ、「フリー許容ベース位置領域」が得られる。ロボットベースがこのフリー許容ベース位置内のどこかに位置するとき、ロボットツールは、その環境中の物体によって制限されることなく、作業を行うべき各ポイント、すなわち各ワークポイントに届くことができる。本発明の一態様によれば、可能なベース位置の組は、フランス、SuresnesのDassault-Systemesから販売されている「CATIA Design and Robot Programming Solution」システムの「衝突テスト」機能など、CADシステムで利用可能な標準機能を使用して、さらに減らすこともできる。このような機能は、ロボットアームがワークポイントからワークポイントへ動く間に衝突が起こるか否かを判定するのに使用される。衝突が起こることになる位置は、考慮から除外される。本発明の別の態様によれば、CADシステムで利用可能な標準機能を使用して、軌道に沿ってワークポイントからワークポイントへ動かすためにロボットの再構成が必要か否かを判定するテストを行うことができる。再構成を生じることになる結果もまた、考慮から除外される。

【0016】フリー許容ベース位置領域を規定した後、次いで、最小限にされたサイクルタイムを達成することになるロボットベース配置のために、その領域内の具体的な位置を識別することが望ましい。本発明の一態様によれば、修正された「シミュレーテッドアニーリング (simulated annealing)」法を採用して、最小限のサイクルタイムに対するロボットベース用の一組の最適ポジションが見つけれられる。従来のシミュレーテッドアニーリングアルゴリズムは当業者によく知られているであろうが、例えば、S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt, Jr., および M. P. Vecchi, 「Optimization by Simulated Annealing」、Science, 220 (4598), pp. 671~680, May 1983に記述されており、これは参照により本明細書に組み込まれている。従来のシミュレーテッドアニーリングアルゴリズムは、この問題に対して単一かつ隔離された最適解しかもたらさず、これは工業CADシステムのコンテキストでは十分でない。さらに、シミュレーテッドアニーリングは、極小値のまさに最下部を訪れない限り正常解から極小値を区別することができないため、長い計算時間を必要とする可能性がある。本発明によれば、従来のシミュレーテッドアニーリング法に2つの特徴が追加されて、この方法の中にある種の「便宜主義 (opportunism)」が構築さ

れる。

【0017】第1の特徴は、「冷凍-加熱」サイクルと呼ばれているものの使用であり、これは、局所的探索プロセスの定期的な適用に対応する。この特徴は、できるだけ速く最低の谷を探索することを目的とし、探索空間中の最も近い極小値をもたらす。第2の特徴は、極小値およびそれらの「アトラクションエリア (attraction area)」を記憶することである。このようにして、最低の谷は、それらが調査されてそれらの最小値が得られた後には再訪されない。このような修正により、実行の終わりに、一組のほぼ最適解が得られると共にそれらの各近傍を知ることができる。この修正を使用しても、ロボットベースに対する単一の絶対的な最適位置が見つかる保証はない。その代わり、従来のシミュレーテッドアニーリング法を使用すれば必要となるよりもずっと少ない計算リソースを使用して、一組のほぼ最適解が得られることになる。

【0018】

【発明の実施の形態】図16を参照すると、本発明の実施に使用できるコンピュータシステム100の物理リソースが示されている。コンピュータ100は、プロセッサホストバス102に接続された中央処理装置101を有し、中央処理装置は、プロセッサホストバスを介してデータ信号、アドレス信号、および制御信号を提供する。プロセッサ101は、Pentium (登録商標) シリーズのプロセッサ、K6プロセッサ、MIPS (登録商標) プロセッサ、Power PC (登録商標) プロセッサ、またはALPHA (登録商標) プロセッサなど、従来の汎用シングルチップまたはマルチチップマイクロプロセッサとすることができる。さらに、プロセッサ101は、デジタル信号プロセッサやグラフィックプロセッサなど、従来の特定目的マイクロプロセッサのいずれでもよい。マイクロプロセッサ101は、それをプロセッサホストバス102に結合する従来のアドレス線、データ線、および制御線を有することができる。

【0019】コンピュータ100は、統合RAMメモリコントローラ104を有するシステムコントローラ103を備えることができる。システムコントローラ103は、ホストバス102に接続されて、ランダムアクセスメモリ105へのインタフェースを提供することができる。システムコントローラ103はまた、ペリフェラルバスブリッジ機能へのホストバスも提供する。したがって、コントローラ103は、プロセッサホストバス102上の信号を一次ペリフェラルバス110上の信号と互換性をもって交換できるようにすることができる。ペリフェラルバス110は、例えば、PCI (Peripheral Component Interconnect) バス、ISA (Industry Standard Architecture) バス、またはMicro-Channelバスとすることができる。さら

に、コントローラ103は、ホストバス102とペリフェラルバス110の間でデータバッファリングおよびデータ転送速度マッチングを実現することができる。したがってコントローラ103は、例えば、64ビット66 MHzのインタフェースおよび533 Mbytes/秒のデータ転送速度を有するプロセッサ101が、データ経路ビット幅、クロック速度、またはデータ転送速度の異なるデータ経路を有するPCIバス110にインタフェースすることを可能にすることができる。

【0020】バス120には、たとえばハードディスクドライブ113に結合されたハードディスクドライブ制御インタフェース111、ビデオ表示装置115に結合されたビデオ表示コントローラ112、およびキーボード/マウスコントローラ121を含めたアクセサリ装置を結合して、プロセッサ101によって制御することができる。コンピュータシステムは、コンピュータシステムネットワーク、イントラネット、またはインターネットへの接続を含むことができる。このような接続を介して、データおよび情報を送信および受信することができる。

【0021】コンピュータ100はまた、基本的なコンピュータソフトウェアルーチンを記憶するための不揮発性ROMメモリ122を備えることもできる。ROM122には、構成データを記憶するための、EEPROM (Electrically Erasable Programmable Read Only Memory) などの可変メモリを含めることができる。BIOSルーチン123をROM122に含め、基本的なコンピュータ初期設定、システムテスト、および入力/出力 (I/O) サービスを提供することができる。BIOS123もまた、オペレーティングシステムがディスク113から「ブート」されるようにするルーチンを含むことができる。ハイレベルなオペレーティングシステムの例は、Microsoft Windows 98 (商標)、Windows NT (商標)、UNIX (登録商標)、Linux、Apple MacOS (商標) オペレーティングシステム、またはその他のオペレーティングシステムである。

【0022】オペレーティングシステムは、RAMメモリ105中に完全にロードされていてもよく、あるいはRAMメモリ105、ディスクドライブ記憶域113、またはネットワークロケーションにある記憶域中に一部を含んでいてもよい。オペレーティングシステムは、ソフトウェアアプリケーション、ソフトウェアシステム、およびソフトウェアシステムのツールを実行するための機能を提供することができる。ソフトウェア機能は、ビデオ表示コントローラ112およびコンピュータシステム100中の他のリソースにアクセスして、設計、ロボット構成、作業場所、および作業場所環境のモデルをビデオコンピュータ表示装置115上に提供することがで

きる。

【0023】(ロボット配置の最適化) 作業中のロボットマニピュレータのパフォーマンスは、対応するトラックに対して相対的なそのポジションによって決まる。そのワークステーションに不適切に配置されたマニピュレータは、非効率的な動作のリスクを冒す。これにより、特定の作業が達成される間にマニピュレータのパフォーマンスが最適化されるような形でポジションを選択することの問題が生じる。

【0024】既存のロボティックCADシステムでは、サイクルタイムの計算は作業のシミュレーションを必要とし、これは非常に時間のかかる操作である。本発明によれば、この作業は、本発明のシミュレーテッドアニーリング法などの最適化アルゴリズムを適用する前に探索空間を単純化することによって、より効率的にされる。これは、ロボットがそこから一組の所与の溶接ポイントのそれぞれに届くことができる「許容ロボットベース位置領域」を規定し、障害物との潜在的な衝突のためにロボットを配置することができない許容ベース位置領域の範囲を表す「障害物シャドウ」を規定することによって達成される。障害物シャドウが許容ベース位置領域から差し引かれて、フリー許容ベース位置領域が得られる。

【0025】図1を参照すると、本発明の方法の概略図が示されている。システムは、システム内またはシステムの外部に記憶された、特定のロボットモデル50の幾何形状に関するデータと、マニピュレータツール51に対するワークプランとを使用する。前述のように、ワークプランは、スポット溶接を加えるなどの作業を行うべき、座標系中の一組の離散的な位置からなる。ロボットモデルの幾何形状は、座標系内でロボットアームの動きの運動特性を決定するのに必要である。フランス、SuresnesのDassault Systemesから販売されている「CATIA Design and Robot Programming Solution」システムの「衝突テスト」機能など、既存のCADシステムによる標準機能を使用して「許容ロボットベース位置領域」が計算され、これを図1のボックス52に表す。図2に、特定のワークプランに対する許容ベース位置領域の一例の図を、60とラベリングして示す。

$$\begin{aligned} r &= l_2 \times \sin(q_2) - l_3 \times \sin(q_2 + q_3) \\ z &= l_1 - l_2 \times \cos(q_2) + l_3 \times \cos(q_2 + q_3) \\ \theta &= q_1 \end{aligned}$$

上式で、 l_i はアームのセグメント i の長さであり、 q_i は関節 i の値である。

【0031】この方程式のシステムを使用すれば、 q_2 、 q_3 、または $q_2 + q_3$ の値に応じた r の値を水平面(その場合 z が定数)で解析的に計算することができる。

【0032】この方法は、まず2つの段階で進行する。

【0033】1. 主要アームのジョイントをその限界内

【0026】再び図1を参照すると、作業空間の座標系内にある障害物の位置および幾何形状を規定するデータ53が検索される。このデータを利用して、ステップ54で、以下により詳細に述べる方法を使用して「障害物シャドウ」が計算される。ステップ55で、障害物シャドウが許容ベース位置領域から差し引かれて「フリー許容ベース位置領域」が計算されるが、この一例を図3に70として示す。図1を参照すると、最適化、すなわちロボット作業のサイクルタイムが最小限にされるフリー許容ベース位置領域内の離散的な数の位置を見つけることが、ステップ56で、修正されたシミュレーテッドアニーリング法を使用して行われる。

【0027】(許容ベース位置領域) 図2、4、および17を参照しながら、許容ベース位置を決定する方法を詳細に述べる。述べたように、許容ベース位置領域は、ロボットベースがそこに配置されたときにロボットマニピュレータが所与のワークプラン中の各ワークポイントに届くことを可能にする、平面の一部である。この領域を決定するために、ロボットの物理的な幾何形状および運動特性を考慮しなければならない。この手法は、作業空間中の6次元参照フレームに達しなければならない、所与のロボットマニピュレータの物理的な観察に基づく。現行の工業ロボット(3本の直交交差軸を含む6本の軸)の場合、主要アーム(ポジションを固定する第1の3本の軸、図4のアイテム41、42、43)およびリスト(配向を固定する残りの3本の軸)を分離することができる。

【0028】図4を参照すると、ロボットのベースに対する参照フレームとして R_0 、ロボットのリストの中心に対する参照フレームとして R_p 、エフェクタのエンドに対する参照フレームまたは基準面として R_e 、および届くべき溶接ポイントに連結される参照フレームとして R_a が定義されている。 R_0 は、 R_e と R_a が一致するとき、円柱座標系(r , θ , z)を使用して R_p に関して参照されることが好都合である。

【0029】この座標系では、3本の軸の主要アームに対して以下の式のシステムが得られる。

【0030】

【数1】

(例えば $q_{2min} < q_2 < q_{2max}$; $q_{3min} < q_3 < q_{3max}$)で掃引することによる、ロボットベースの作業空間の解析。この解析により、一組の円が得られる。

【0034】2. エルボ構成(すなわち $0 < q_3 < \pi$)および閉連鎖(すなわち $q_{pmin} < q_2 + q_3 < q_{pmax}$)からくる制限の解析。この解析によっても、一組の円が得られる。

【0035】次いで、リストジョイント限界の制限を考

慮する必要がある。スポット溶接用ロボットに最も一般的に使用されるリストである、3本の共同する軸を有するリストの場合、リストの動く範囲の制限は、ジョイント q_5 の変動が実際には小さい(すなわち $q_{5min} < q_5 <$

$$\dot{\mathbf{u}} = (\sin \theta \cos \alpha, -\cos \theta \cos \alpha, -\sin \alpha)$$

は軸4の指示ベクトルであり、

【0037】

【数3】

$$\dot{\mathbf{v}} = (0, \cos \beta, -\sin \beta)$$

$$\dot{\mathbf{u}} \cdot \dot{\mathbf{v}} < \cos(q_{5min}) \text{ および } \dot{\mathbf{u}} \cdot \dot{\mathbf{v}} < \cos(q_{5max})$$

$\alpha = q_2 + q_3 - (3\pi/2)$ とした場合(図17参照)、リストがその限界にある場合のロボットベース位置を解析的に計算することができる。

【0039】各ワークポイントに対する解析を行うことによって、一組の平面エリアまたは面が得られ、その共通エリアが、許容ベース位置領域の範囲を定める。これらのセクションは、一組の曲線または直線の投影によって境界を定められた平面の一部である面で表される。一例として、図2に、1つの溶接ポイントおよび「エルボアップポジション(elbow up position)」に対するこれらのセクション60の1つを示す。溶接ポイントは、ロボットのベースがこの面の内のどこかにあればロボットから届くことができる。溶接ポイントの所与の組に対する許容ベース位置領域は、すべての溶接ポイント面に共通の、平面内のエリアである。

【0040】(障害物シャドウ)計算のこの段階で、特定ポジションのロボットのエルボに対する許容ベース位置領域の水平セクションを表す一組の面が得られた。しかし、これらのセクションは、ロボットとその環境の間の衝突回避制約を考慮しない。

【0041】これは、障害物シャドウ、すなわち、ロボットを配置するとエンドエフェクタが所与のワークポイントに達したときに障害物との衝突が起こるためにロボットを配置することができない許容ベース位置領域の範囲を決定することを必要とする。この領域の水平セクションは得られたため、この方法は、ロボットのベースをこれらのセクション中で動かして衝突をテストすることにある。

【0042】図5に、一組のワークポイントの一例(1から6)を示すが、この場合は、所与のワークプラン軌道における自動車のフロントガラスの周りにあるスポット溶接位置である。衝突回避を決定するために、ロボットのエンドエフェクタが、リストと障害物の間で衝突回避を可能にする配向で各ワークポイント上に連続して配置される。したがって、図2を参照すると、主要アームの先端61は、対応するリストの中心62によって決まり、そのベース63は、許容ベース位置領域60のセクション中で動かすことができる。衝突をテストする方法の1つは、許容ベース位置領域60を離散的なセクシ

q_{5max})という事実による。図17からの表記を使用すると、

【0036】

【数2】

は軸6の指示ベクトルであり、リスト制約は、以下の形をとる。

【0038】

【数4】

ンに分割し、得られるあらゆる配置をテストすることであろう。しかし、本発明によれば、いくつかの簡略化によって、必要な衝突テストの数がかなり削減される。

【0043】図4に示したこの例のロボットタイプは6本の軸に制限されているため、リストの中心40は、所与のベース配置の場合に、それ自体およびロボットの第1の軸41によって規定される平面中でしか動かすことができない。図6に、これらの制約に従ったリストの中心80の可能な動きの図を示す。アームと所与の障害物81との間の衝突は、少なくともロボットが「視界セクタ」中に配置されているときに起こる。このセクタは、ツールが所与のポイントに位置するときのリストの中心80を通過する垂直線82と、障害物81に一点で接し、かつ前述の線82を通過する垂直平面83および84とによって規定される。視界セクタは、平面83と84の間のくさび型空間である。視界セクタの唯一対象となる部分は、許容ベース位置領域と一致する部分であり、許容ベース位置領域の限界を曲線85および86で示す。この目標は、障害物シャドウのアウトラインを計算して、得られた面をベース位置領域から差し引くことである。

【0044】採用する方法は、参照により本明細書に組み込む、B. FaverjonおよびP. Tournassouの「The Mixed Approach for Motion Planning: Learning Global Strategies from a Local Planner」、International Joint Conference on Artificial Intelligence, pp. 1131~1137, 1987で提案された方法に基づく。これは、問題を2つのレベルに分離する。大域レベルでは、評価グラフが構築され、このグラフのノードは、ロボティクスシステムの構成空間の比較的大きいセルを表す。最初と目標の構成が与えられれば、グラフ中の従来の最小コストパス発見アルゴリズムにより、大域パスをもたらすセルのリストが得られる。実行中、局所パスプランナが動きを生成し、衝突をテストする。障害があった場合、すなわちロボットが何らかのセルを目指す間にブロックされた場合は、グラフ中の

更新された重みで新しい大域パスが計算される。

【0045】この手法は、エンドエフェクタを所与の溶接ポイント上に配置して、許容ベース位置領域のセクション中でロボットのベースを動かすときに開始される。この方法を、図7の流れ図および図8の図によって図示する。これらの図を参照すると、この方法は以下の通りである。

【0046】1. 視界セクタの二等分線として大域パス500を規定する。初期ポイント501は、この線と領域セクションの外側の輪郭502との交差点から得られる。この目的は、ロボットのベースをパスの目標ポイント503に動かすことである。目標ポイント503は、セクション504の内側の輪郭上にある(図7、ステップ700から702)。

【0047】2. 衝突505が検出されるまで、所与のステップによってこのパスをたどる(図7、ステップ703から705)。

【0048】3. 第1の衝突がみられたとき、障害物シャドウを左によけて動く(506)。ベースが目標ポイント503に直接に動かすことができないときは毎回、新しいベース位置と目標ポイント503を結ぶ線として大域パスを再規定する。大域パスを再びたどることができるようになるまでこのステップを繰り返す(図7、ステップ703から707)。

【0049】4. 第1の衝突が検出されたベース位置501に戻る(図7、ステップ708)。左によけたときと同じ前述の仕方、障害物シャドウを右によけて再び動く(507)。

【0050】5. 障害物シャドウの完全に閉じた輪郭を得るために、前の諸ステップで使用した目標ポイント503を初期ポイントとし、前のプロセスが始まった位置に到達することを目的として同じプロセスを繰り返す。障害物回避テストは、前につかつたベース位置に再びつつかるまで継続する。

【0051】このような方法を適用することにより、障害物シャドウの閉じた輪郭をそれから導き出すことのできる一組のポイントが得られる。次いで、このアウトラインから面を作り出し、それをベース位置領域の対応するセクションの面から差し引けば十分である。したがって、フリー許容ベース位置領域のセクションが得られる。

【0052】前述のプロセスは、各障害物およびワークプランの各ポイントに適用しなければならない。この方法の使用は、障害物シャドウのアウトラインに隣接するポイントだけがテストを受けるため、衝突テストの数を削減するので有利である。

【0053】前述の方法を実行する結果、図3に示すように、フリー許容ベース位置領域の正確な描写を得ることができる。フリー許容ベース位置領域70は、許容ベース位置領域のサブセットである。ロボットベースがフ

リー許容ベース位置領域70の範囲内にある限り、ロボットのツールが溶接ポイント上に配置されるときに衝突が起こらないことになる。

【0054】(作業の実現可能性) 前述の方法を使用してフリーな許容ベース位置領域を決定し、すべての制約(ジョイントの限界、衝突)が考慮されたように見えても、作業の実現可能性を保証するには十分でないことがある。具体的には、ロボットのベースがフリー許容ベース位置領域中に配置されているときに、ロボットがどんな衝突もなくワークプランのポイントに届くことができるか否かは分かっている。しかし、2つの連続するポイント間で自由に動くことができない可能性が依然としてあるために、この位置は、ロボットが軌道全体をカバーすることを可能にしない場合がある。ロボットがその作業空間中で自由に動く能力は、P. WengerおよびP. Chedmailの「Ability of a Robot to Travel Through its Free Workspace in an Environment with Obstacles」、The International Journal of Robotics Research、10(3)、1991に記述されている。「可動性」の概念が、様々な属性およびそれらに対応する必要十分条件を通して導入される。これらの属性は、例えば、構成を変更せずにどんな連続する軌道も達成することのできるエリアの特徴を可能にする。

【0055】この目的は、ロボットがトラックのポイントをつなぐことができるか否かをチェックすることである。許容CPU時間でこの目標を達成するためには、マニピュレータの効率を評価するための局所テストツールに頼ることが必要となる。したがって、これらのツールは、所与の位置にあるロボットのベースに対する結果をもたらすことになる。2つのケースが起こり得る。再構成なしにロボットが2つの連続するポイントをつなぐことができないケース、または2つの連続する溶接ポイント間で衝突が検出されるケースである。

【0056】(再構成がないこと) トレースの2つの連続するポイントに同じ構成で到達しなければならないと仮定すると、構成を変更せずにこれらのポイントをエンドエフェクタによってつなぐことができるか否かを検証する必要がある。再構成はサイクルタイムの増加を生じる可能性があり、したがって回避すべきである。

【0057】考察中のポイントは、構成空間の同じ結合コンポーネントに属していなければならない。「構成空間の結合コンポーネント」は、P. BorrelおよびA. Liegeoisの「A Study of Multiple Manipulator Inverse Kinematic Solutions with Applications to Trajectory Planning and to Work

Space Determination」, Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 1180~1186, 1986に記述されているように、アスペクトによって規定される。したがって、作業を実行せずに再構成を検出することができる。

【0058】したがって、再構成される場合、ロボットのベース位置は無視される。いずれかのベース位置に対する再構成なしにパスを移動することができない場合は、ベース位置を評価するための基準として再構成回避を使用せずに最適化アルゴリズムが再開する。

【0059】(衝突のないこと) 起こり得る第2の問題は、作業の実行中に衝突を検出することであり、これは、置換が許されないことを意味する。これらの衝突は、軌道の、事前定義された所与の一群の中間ポイント上での衝突を作業の実行前に局所的にテストすることによってみられる。衝突があった場合、評価されたベース位置は、単純に削除される。

【0060】どのベース位置に対する衝突もなくパスを移動することができない場合、最適化プロセスは、オペレータが軌道上に追加のポイントを規定できるようにするために停止する。さらに、最適化アルゴリズムの必要性に見合うように、作業は、多数のベース位置に対して実現可能でなければならない。

【0061】(シミュレーテッドアニーリング) 前述のプロセスの結果として、削減された一群の可能なベース位置が得られ、次いで、これを最適化に向けてテストすることができる。これは、最適なベース位置の探索時間がかなり削減されるために有利である。上で論じたように、本発明の一態様によれば、周知のシミュレーテッドアニーリング法の修正形を使用して、ほぼ最適な一群のベース位置を選択することができる。これらの修正を、シミュレーテッドアニーリング法の簡単な概観に従って以下に述べる。

【0062】シミュレーテッドアニーリング法の概念は、例えば、S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt, Jr. および M. P. Vecchi の「Optimization by Simulated Annealing」, Science, 220 (4598), pp. 671~680, May 1983 に記述されている。シミュレーテッドアニーリングは、多くの変数の関数を最小化するなどの最適化問題を解決する方法を指す用語である。通常、これは、関数を最小化する何らかの構成のパラメータ、例えばサイクルタイムを見つけることを含み、本明細書ではこれをコストと呼ぶことにする。

【0063】シミュレーテッドアニーリングは反復改善に基づき、これは、いくつかの既存のサブ最適構成またはサブ最適解で始まり、わずかな進行でそれに摂動を起

こさせることを含む。新しい構成または解が古いものよりもよい場合は、新しい解が受諾され、プロセスは再開する。単純な反復方法は、新しい構成が古い構成の改善である場合にのみ受諾される点でやや粗雑である。したがって図9を参照すると、これは初期構成から始まっている。これに摂動を起こさせ、よりよい解だけを受諾する、すなわち下り坂だけを移動する。したがって、最終的にポイントAに達し、上り坂は許されないためにどこにも行くことができない。したがって、大域的最小値がポイントBにあるにもかかわらず極小値Aで行き詰まる。

【0064】シミュレーテッドアニーリングは、次の仕方で行われる。まず、最小化の開始ポイントが選択され、現ポイントとしてラベリングされる。次に、ポイントの近傍で新しいポイントが選び取られる。新しいポイントが現ポイントよりも低い値の関数を有する場合、これは、単純な反復方法におけるように自動的に「現」ポイントとして次のステップ用に採用される。そうでない場合は、ランダムな数が引き出される。このランダムな数は、新しいポイントが現ポイントに採用されることになるか否かを判定する。これにより、極小値から外にジャンプする能力がシミュレーテッドアニーリングに与えられる。

【0065】シミュレーテッドアニーリングの実施は、3つのパラメータを規定することを含む。新しいポイントが受諾される確率と、いわゆる温度降下関数と、および温度降下の数である。

【0066】これらを以下のように述べる。

【0067】1. 新しいポイントが受諾される確率
新しいポイントjと現ポイントiとの差がゼロより小さい場合は、受諾の可能性は1である。差がゼロよりも大きい場合は、受諾の可能性は、以下のようになる。

【0068】

$$p(\Delta c_{ij}, T) = \exp(-\Delta c_{ij}/T)$$

上式で、 $\Delta c_{ij} = c(j) - c(i)$ である。

【0069】Tは単に、コスト関数と同じユニット中の制御パラメータであり、「温度(Temperature)」と呼ばれる。

【0070】最初、Tの値は相対的に大きく、したがって、コストを増加させる多くの動きが受諾される。最適化プロセスの間、温度は徐々に下げられ、したがって、受諾される、コストのかかる動きはだんだん少なくなる。

【0071】2. 温度降下関数

Kirkpatrick (S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt Jr. および M. P. Vecchi の「Optimization by Simulated Annealing」, Science, 220 (4598), pp. 671~680, May 1983) は、0.95の温度降下率を提案した。Sec

hen (C. Sechen, 「VLSI Placement and Global Routing Using Simulated Annealing」, Kluwer Academic Publisher s, Boston, 1988) は、高いかまたは低い温度ではシステムがより少ない状態変化を必要とすることを指摘した。しかし、状態変化は、中間温度では重大である。したがって、温度降下率は、最高温度および最低温度では0.8に、ただし中間温度では0.95に設定することができる。

【0072】

$$T_n = \alpha(T) T_{n-1} \quad (0 < \alpha(T) < 1)$$

上式で、 $\alpha(T)$ は温度降下率を表す。

【0073】初期温度は、計算の始めにみられる最初の10個のレイアウトを受諾するように選択される。

【0074】3. 温度降下の数

この目的は、温度をその初期値の5%だけ下げることである。したがって、温度降下率は、温度降下関数から直接に導き出すことができる。

【0075】ロボット配置の問題に適用されるシミュレーテッドアニーリングを、図10の流れ図を参照することによって示す。最初に、ロボットの初期配置が選択され(ステップ200)、現在の解として設定される(ステップ201)。さらに、シミュレーテッドアニーリング法に向けて初期パラメータTおよびkが設定される(202)。次いで、現ポイントの近傍ポイントに対するサイクルタイムのコストの解が計算され(ステップ203)、次いでそれは、現在の解と比較される(ステップ204)。ステップ205で、新しい解が現在の解よりも低い場合は、現在の解に対する値が自動的に新しい解の値で置換され(ステップ206(イエス))、プロセスは繰り返される。しかし、新しい解が現在の解よりも高い場合は(ステップ205(ノー))、0と1の間为数がランダムに選択され(ステップ207)、次いで、ステップ208に示すように、前述の確率関数によって決定された確率値と比較される。ランダムな数の生成および前述の確率関数は、新しいポイントが現ポイントとして採用されることになるか否かを判定し、極小値の外へジャンプする能力をシミュレーテッドアニーリングに与える。新しい値が受諾されることを確率関数が指示する場合は(ステップ208(イエス))、それが現在の解ほどよい解ではない事実にもかかわらず、新しいポイントが現ポイントとして設定される(ステップ206)。一方、新しい解が拒絶された場合は(ステップ208(ノー))、次の反復セットに向けて温度が下げられるべきか否かが判定される(ステップ209)。これは、所定数の近傍解が評価されたか否かによって判定される。下げられない場合(ステップ209(ノー))、プロセスは、同じ温度値を使用して繰り返される。十分な数の解が評価された場合は(ステップ209(イエ

ス))、前述の温度降下関数に従ってTの値が下げられる(ステップ210)。温度の最小値が得られるまでプロセス全体が繰り返され(ステップ211)、得られたときにプロセスは終了する。温度を変更する前に評価する、近傍解の数は、最初は経験に基づいて推測することによって設定され、かつ、後に経験に基づく知識によって設定される。

【0076】(シミュレーテッドアニーリングの応用) 本発明は、シミュレーテッドアニーリング法に対する変更および向上を含み、したがって、CPU時間を削減することによってこの方法を改善する。これらの変更は、いくつかの理由でなされた。従来のシミュレーテッドアニーリングが採用された場合に得られるであろう単一かつ隔離された最適ベース位置を得ることは、工業CADシステムのコンテキストでは十分なものではない。実際、ロボットおよびその環境の幾何形状モデリングは、現実世界を十分な精度で表さない。シミュレーテッドアニーリング法から得られた結果がパフォーマンスの低下を生じる配置で取り巻かれると仮定した場合、結果を現実の現場に移行することは不可能であろう。したがって、大域的最適解に近い解を含み、ユーザによって定められた定義済みの率よりも低いパフォーマンスロスを保証する領域を得ることが有利であろう。

【0077】さらに、シミュレーテッドアニーリング法は、長い計算時間を必要とする。長大な計算の理由の1つは、シミュレーテッドアニーリングが、極小値のまさに最下部を訪れない限り通常解から極小値を区別することができないことである。シミュレーテッドアニーリングは、初期段階の間、温度が高いときに、調査空間の広いエリアをサンプリングするが、ずっと後で温度が下げられたときにしか極小値に深く下降しない。これは、ロボットのベースが大域的最小値のアトラクション領域に早くに入ったとしても、シミュレーテッドアニーリング法は局所探索を行わず、領域全体の探索を継続することを意味する。これは非常に望ましくない。シミュレーテッドアニーリングが探索の早い段階で局所探索に専心するように、従来のシミュレーテッドアニーリングに何らかの「便宜主義」を構築することが有利であろう。本発明によれば、修正されたシミュレーテッドアニーリングアルゴリズムが、新しい2つの特長によってこの目的を達成するように設計された。

【0078】(冷凍-加熱サイクル) 局所探索問題の解決に対処するためには、2つのファクタが重要である。第1は、局所探索に付することが、実際には傾斜下降の実施を意味することである。第2の事実、温度がゼロに近いときにシミュレーテッドアニーリングが傾斜下降と等価であることである。したがって、シミュレーテッドアニーリングアルゴリズムに便宜主義を加えるためには、極小値の最下部に達するのに必要なだけ長く温度をゼロ近くまで下げるだけで十分である。その後、温度は

その初期減少スケジュールを回復することができる。この方式は、「冷凍-加熱サイクル」と呼ばれる。

【0079】(極小値の記憶)理想的には、最低の谷をできるだけ速く探索し(冷凍)、できるだけ速く脱出し(加熱)、二度と訪れないことが有利である。同じ極小値を再訪することを避けるため、本発明によれば、それまでに見つかったすべての極小値のリストが、それらのアトラクションエリアと共に記憶される。この目的で、極小値のアトラクションエリアが、傾斜下降がそこからこの極小値で終了するとされるすべてのベース位置の組として規定される。実際には、このような組を解析的に記述することは不可能であり、アトラクションエリアは、傾斜下降の最初のベース位置を経由する、極小値を中心とした円に対応することになる。これを図11に図示するが、ここでは円90内のエリアがアトラクションエリアである。経線d(93)は、極小値91から解まで、または下降アルゴリズムがそこから適用されて極小値91を見つけることになった位置92までの距離によって確立される。図12に示すように、後で、アトラクションエリア90の外にある別の位置95からの傾斜下降が90の中にある構成中で終了する探索の間にいつでも、アトラクションエリア90のサイズは、位置95を含むように更新され、円96を境界とする拡張されたアトラクションエリアが得られる。このようなアトラクションエリアは、真の極小値アトラクションエリアのサイズを過大評価する可能性がある。しかし、修正された方法は、これがシミュレーテッドアニーリング法の集束特性に影響しないようにうち立てられ、同時に、よりよい結果をもたらす。傾斜下降は、実際、いずれかの既存のアトラクションエリアの外にある構成からしか開始されず、構成はアトラクションエリア内にあり、シミュレーテッドアニーリングはランダムなステップを実行しつづけて、おそらく新しい最小値を生じることになる。

【0080】図13を参照すると、このイノベーションの、修正されたシミュレーテッドアニーリングアルゴリズムの方法が示されている。したがって、フリー許容ベース位置領域から初期ロボット位置が選択され(ステップ600)、この位置が現在の解として設定され(ステップ601)、温度関数が初期設定される(ステップ602)。次いで、現在の解がアトラクションエリア内にあるか否かが判定される(ステップ603)。アトラクションエリア内にある場合は、標準的なシミュレーテッドアニーリングが適用されて大域的最適解がエリア内で見つけられる。図13を参照すると、これは、ステップ604から615を含み、ステップ607、613、615で必要とされるクエリ「 $T=0$ 」への回答は、否定で回答される。この場合、温度は温度降下関数に従って下げられる。

【0081】しかし、現在の解がアトラクションエリア内でない場合は、冷凍-加熱サイクルは、 T からゼロの

値を設定することによって適用され(ステップ619)、極小値から外にジャンプするかまたは「上り坂を」登る可能性なしに最小値に向かって迅速に作用する下降アルゴリズムが得られる。評価されている解がアトラクションエリア中でない場合は、2つの結果のうちの1つが生じる。下降アルゴリズムの間に解が既存のアトラクションエリアのエリアの中に下降する場合は、既存のアトラクションエリアは、下降アルゴリズムが端を発した解を含むように更新され、この場合、図12に示すように、そのアトラクションエリアのサイズが増大される。これを図13のステップ616に示す。このステップで、ステップ606で判定された、初期解よりもよい解は、ステップ613中のクエリが肯定で回答される($T=0$)のためにステップ616に達する。ステップ616で、新しい解が既存のアトラクションエリア内であることが判定され、次いでアトラクションエリアは、下降アルゴリズムが端を発した解を含むように更新されて、拡張されたアトラクションエリアが得られる。

【0082】一方、下降アルゴリズムの間に、解が既存のアトラクションエリア内に収まらずに最小値まで下降した場合は、極小値が新しいアトラクションエリアの中心で見つかったと判定される。この場合、対応するアトラクションエリアが作り出されて記憶される(図13、ステップ621および622)。

【0083】(例)ここで、本発明の方法を応用した一例を、図5に示すように溶接ツールを車のウィンドスクリーンの様々なポジションに持ってくることによって規定されるワークプランに関して述べる。このワークプランは、固定した位置および配向の6つのポイント(1から6)で構成されたもので、個々の動きはデカルト空間中のセグメントにある。

【0084】ワークプランは、どんな配置が選択されても車体との衝突を避けるように設計されている。このようにして、この例は、考察中のワークプランに対する許容ベース位置領域ができるだけ広くなるような、修正されたシミュレーテッドアニーリング法のパフォーマンスに焦点を当てている。

【0085】シミュレーテッドアニーリング法の修正により、計算の始めに傾斜下降から得られる一組の局所最適解がもたらされる。図14に、大域的最適配置の近傍にあるそれらの位置を図示する。これらの配置は、初期に考慮されなかった追加の制約が作業場所に加えられて、いくつかのベース位置が実際的でなくなった場合に有利なことがある。本発明の修正されたシミュレーテッドアニーリング法の、一組のほぼ最適なポイントを得る能力は、従来のシミュレーテッドアニーリング法に勝る大きな利点であり、これは、ただ1つの最適ポイントをもたらす。実際は、作業場所環境は頻繁に変更を受ける。そのような変更が起こり、1つまたは複数のベース位置が動作可能になったとき、ユーザは、修正されたシ

シミュレーテッドアニーリング法で見つけた一組のほぼ最適な位置から別の位置を迅速に選択することができる。したがって、よいロボットベース位置を見つけるための新しい制約で完全に新しいシミュレーションを行う必要なく、新しい配置場所がすぐに利用可能である。

【0086】例において見つけれられたロボットのベースの最適位置から、1.84秒のサイクルタイムが得られ、これは、最悪パフォーマンスを伴う位置と比較して38パーセントの改善である。図15に、図14で示した最適配置(14)がベース位置領域150内に配置されているのを示す。最適ポジションは、ベース位置領域150の輪郭に相対的に近い。それにもかかわらず、10パーセントより小さいパフォーマンスロスを保証する範囲は、比較的広い(図14)。このような結果に対する計算時間は5分であり、その95パーセントは、CADソフトウェアによる目的関数評価に必要とされるものであった。

【0087】前述の方法は、CAD/CAMシステムによって規定できるどんな作業場所構成に向けたロボット配置にも適用することができることを理解されたい。本発明は、デジタル電子回路中、あるいはコンピュータハードウェア、ファームウェア、ソフトウェア、またはそれらの組合せの中で実施することができる。本発明の装置は、プログラマブルプロセッサによって実行するために機械読取可能な記憶装置中に実体的に組み入れられたコンピュータプログラム製品中に実装することができ、本発明の方法ステップは、入力データに対して動作し出力を生成することによって本発明の関数を実行する命令のプログラムを実行するプログラマブルプロセッサによって行うことができる。

【0088】本発明は、データ記憶システム、少なくとも1つの入力装置、および少なくとも1つの出力装置からデータおよび命令を受け取り、かつ、それらにデータおよび命令を送るように結合された、少なくとも1つのプログラマブルプロセッサを備えるプログラマブルシステム上で実行可能な1つまたは複数のコンピュータプログラム中で実施することが有利な場合がある。アプリケーションプログラムは、高級手続き型プログラミング言語またはオブジェクト指向プログラミング言語で、あるいは望むならアセンブリ言語または機械語で実施することができ、いずれの場合でも、言語はコンパイル済みまたは解釈済み言語とすることができる。

【0089】一般に、プロセッサは、命令およびデータを読取専用メモリおよび/またはランダムアクセスメモリから受け取ることになる。コンピュータプログラム命令を実体的に組み入れるのに適した記憶装置には、例としてEPROM、EEPROM、フラッシュメモリ素子などの半導体メモリ素子、内部ハードディスクやリムーバブルディスクなどの磁気ディスク、光磁気ディスク、およびCD-ROMディスクを含めた、すべての形の不

揮発性メモリが含まれる。前述のものはいずれも、特別に設計されたASIC(特定用途向けIC)で置換するかまたはそれに組み込むことができる。

【0090】本発明のいくつかの実施形態を述べた。本発明の趣旨および範囲を逸脱することなく様々な修正を加えることができることは、理解されるであろう。したがって、他の実施態様は、頭記の特許請求の範囲内にある。

【0091】

【発明の効果】したがって、本発明によれば、ワークからみたロボットのベースの可能な最適配置を効率的な仕方で見つけるためのシステム、方法、および装置が提供される。

【0092】また、本発明によれば、従来のシミュレーテッドアニーリング法を使用すれば必要となるよりもずっと少ない計算リソースを使用して、一組のほぼ最適な解が得られることになる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明のシステムの概略図である。

【図2】本発明による、そのベースが水平面中の許容ベース位置領域内に配置されたロボットの図である。

【図3】本発明による、そのベースが水平面中のフリー許容ベース位置領域内に配置されたロボットの図である。

【図4】ロボットの動きの軸を示す座標系内に位置するロボットの図である。

【図5】作業、この場合には自動車のフロントガラス窓の周りにある一組のスポット溶接を行うロボットエンドエフェクタによってたどられる軌道の一例を示す図である。

【図6】本発明による、「障害物シャドウ」の計算に使用される「視界セクタ」の一例を示す図である。

【図7】本発明による、フリー許容ベース位置領域を計算する方法の概略図である。

【図8】障害物シャドウを決定するための本発明の方法によって、ロボットのエンドエフェクタの動きをシミュレートした図である。

【図9】極小値があるときに単純な反復法を使用して大域的最小値を決定することの問題を示す図である。

【図10】シミュレーテッドアニーリング法の概略図である。

【図11】本発明による「アトラクションエリア」の図である。

【図12】本発明による、初期データポイントからアトラクションエリア中への傾斜下降から得られるアトラクションエリアの拡張の図である。

【図13】本発明による修正されたシミュレーテッドアニーリング法の概略図である。

【図14】本発明のシミュレーテッドアニーリング法によって生成された、一組のほぼ最適なデータポイントの

立体グラフ (graphic illustration in landscape form) である。

【図15】フリー許容ベース位置領域上に重ねられた図14のデータポイントのフィールドを示す図である。

【図16】本発明で利用できるコンピュータシステムのブロック図である。

【図17】許容ベース位置領域を決定するための解析的枠組みを形成する、ロボットのリストジョイント座標系の図である。

【符号の説明】

14 最適配置

60 許容ベース位置領域

61 主要アームの先端

62 リストの中心

63 ベース

70 フリー許容ベース位置領域

80 リストの中心

81 障害物

85 ベース位置領域の限界

86 ベース位置領域の限界

90 アトラクションエリア

91 得られる局所最適解

91 極小値

92 下降アルゴリズムがそれから適用された解

96 更新されたアトラクションエリア

100 コンピュータシステム

101 CPU

105 RAM

106 キャッシュSRAM

102 CPUバス

102 プロセッサホストバス

103 システムコントローラ

104 DRAMコントローラ

104 統合RAMメモリコントローラ

105 RAM

110 ペリフェラルバス

111 ハードディスクドライブ制御インタフェース

114 ネットワークアダプタ

112 ビデオコントローラ

113 ハードディスクドライブ

115 ビデオ表示装置

120 ISAバス

121 キーボードコントローラ、RTC、シリアルポート、パラレルポート

122 ROM

123 BIOS

124 オーディオ

150 ベース位置領域

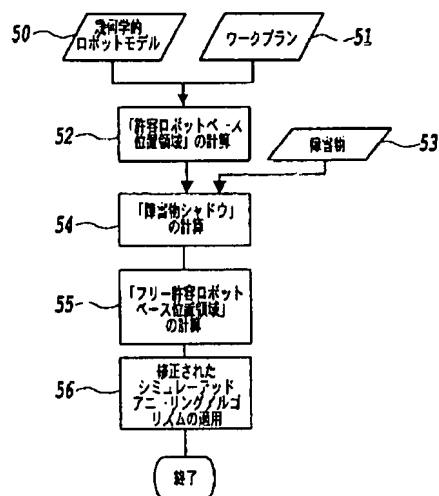
500 初期大域パス

501 初期ポイント

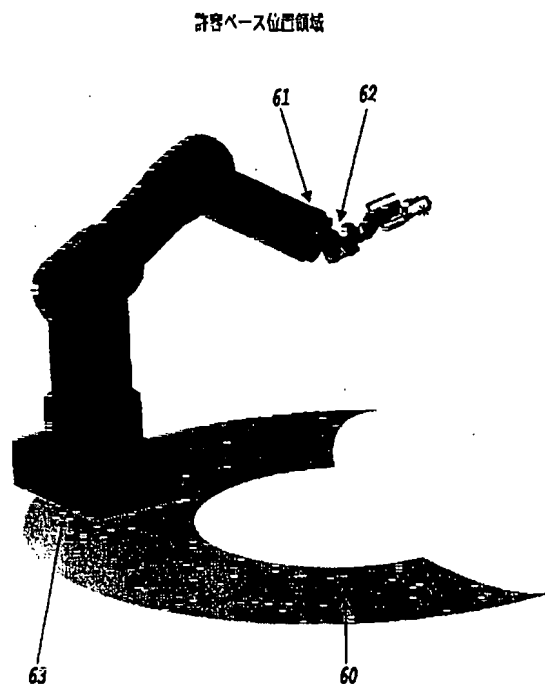
502 外側の輪郭

503 目標ポイント

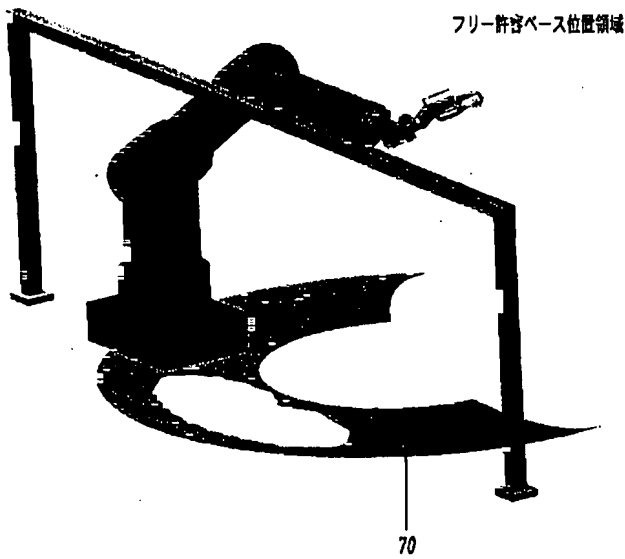
【図1】



【図2】

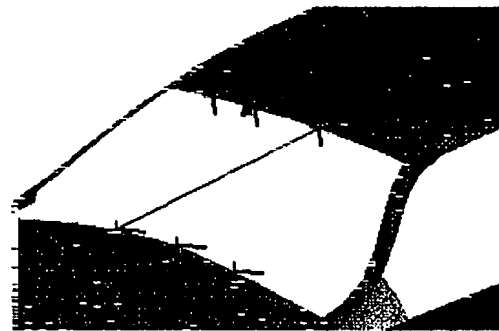


【図3】



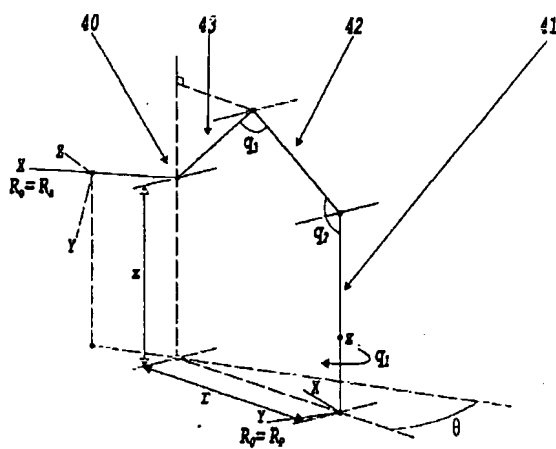
【図5】

トフックの例示

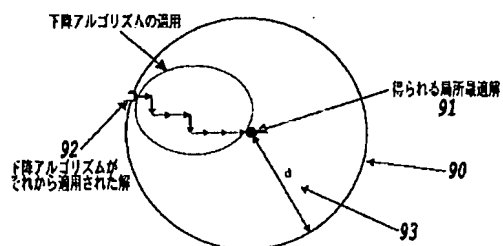


【図4】

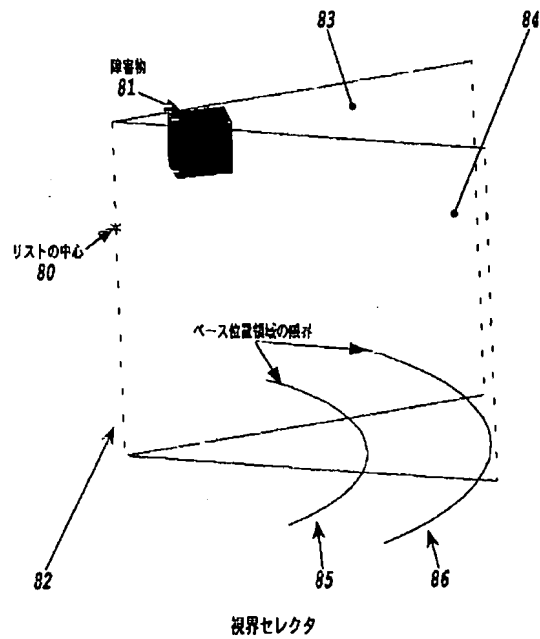
円柱座標系



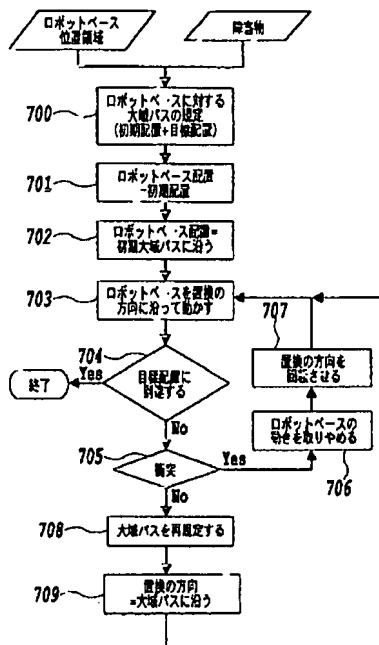
【図11】



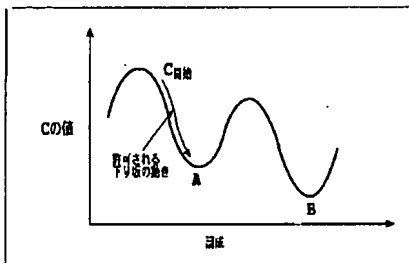
【図6】



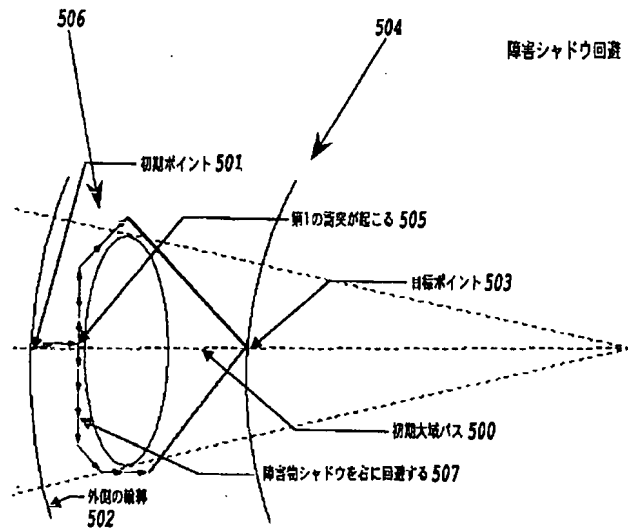
【図7】



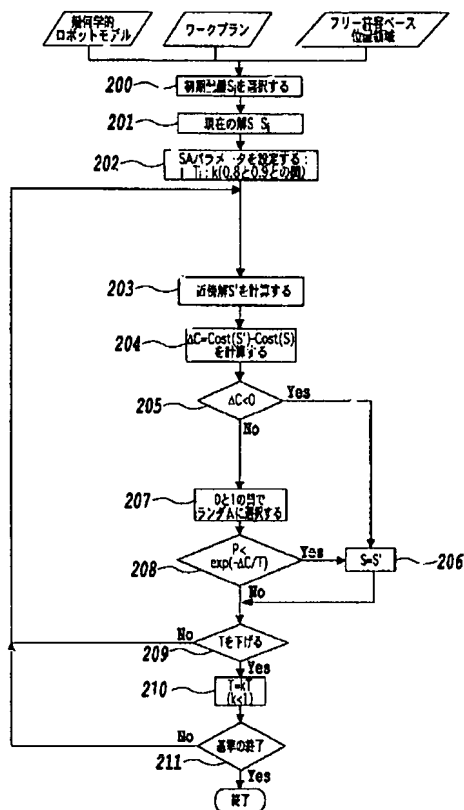
【図9】



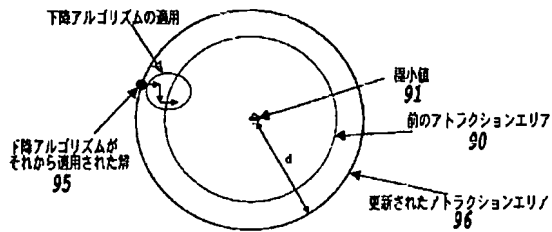
【図8】



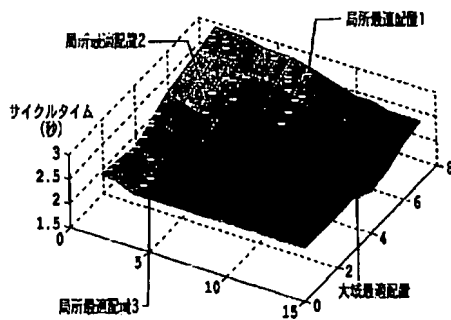
【図10】



【図12】



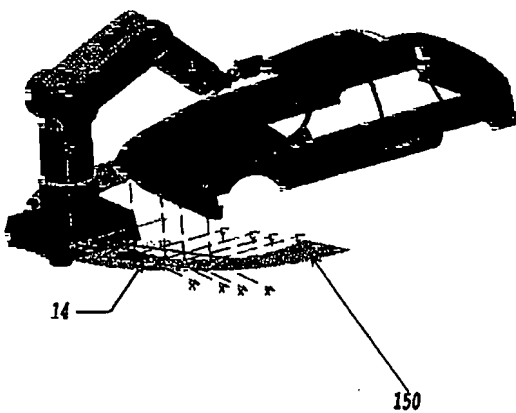
【図14】



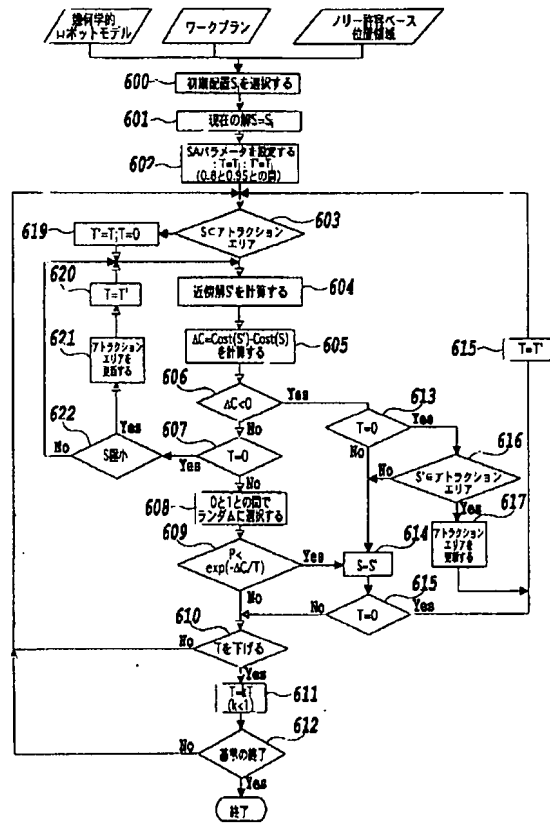
大域および局所最適配置の視覚化

【図15】

最適化の結果

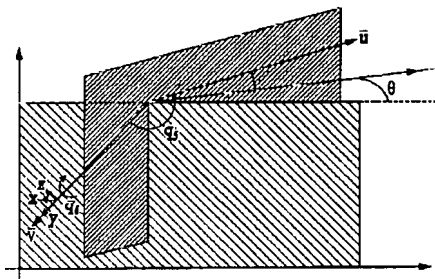


【図13】

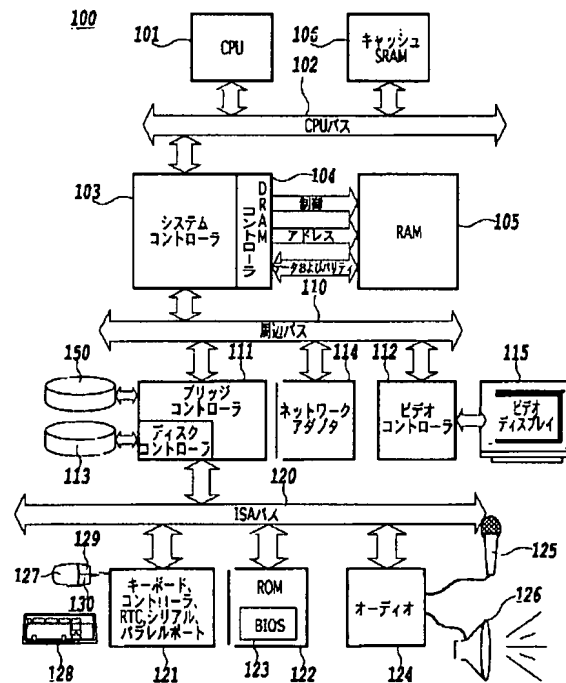


【図17】

リストのパラメータ



【図16】



従来例

フロントページの続き

(51)Int.Cl.⁷
G 0 6 F 17/50識別記号
6 1 2
6 3 4F I
G 0 6 F 17/50(参考)
6 1 2 L
6 3 4 C

(71)出願人 500102435

9, quai Marcel Dassault,
BP 310 92156 Suresnes
Cedex, FRANCE